



# **Engenharia Moderna:** Soluções para Problemas da Sociedade e da Indústria 3

Fábio Andrijauskas  
Anete Silva Faesarella  
Laira Lucia Damasceno de Oliveira  
(Organizadores)

**Atena**  
Editora  
Ano 2022



# **Engenharia Moderna:** Soluções para Problemas da Sociedade e da Indústria 3

Fábio Andrijauskas  
Annete Silva Faesarella  
Laira Lucia Damasceno de Oliveira  
(Organizadores)

**Atena**  
Editora  
Ano 2022

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



# Engenharia moderna: soluções para problemas da sociedade e da indústria 3

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Yaiddy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** Fábio Andrijauskas  
Annete Silva Faesarella  
Laira Lucia Damasceno de Oliveira

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia moderna: soluções para problemas da sociedade e da indústria 3 / Organizadores Fábio Andrijauskas, Annete Silva Faesarella, Laira Lucia Damasceno de Oliveira. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0095-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.950221105>

1. Engenharia. 2. Sociedade. 3. Indústria. I. Fábio Andrijauskas (Organizador). II. Annete Silva Faesarella (Organizadora). III. Laira Lucia Damasceno de Oliveira (Organizadora). IV. Título.

CDD 620

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

Nos anos de 2020 e 2021 tivemos a primeira e a segunda edição do livro “Engenharia Moderna: Soluções para Problemas da Sociedade e da Indústria” e agora, em 2022, com muito orgulho lançamos sua terceira edição. Esta edição atual provém de trabalhos desenvolvidos durante a pandemia da COVID-19, um período que nos fez refletir sobre a importância da ciência e o desenvolvimento tecnológico no mundo atual, aliados na descoberta de soluções para problemas de diferentes âmbitos, haja vista as vacinas desenvolvidas no intuito de resolver esta situação tão sensível e desafiadora. Realmente, um momento que mudou a vida de todos e que ficará para sempre em nossas lembranças.

Em tempos que, mais do que nunca, necessitam de união e paz, apresentamos este conteúdo com diversos autores, demonstrando que a diversidade de pensamento, ideias e conhecimento são pilares para o avanço da ciência. Cada capítulo foi elaborado com dedicação e comprometimento dos pesquisadores, e traz mais um resultado de sucesso para diversas áreas do conhecimento, como as Engenharias, a Saúde e o Meio Ambiente.

Mais uma vez, agradecemos à Editora Atena pela oportunidade do lançamento do nosso terceiro livro, proporcionando uma via eficaz de disseminação de conhecimento e de suas contribuições para a sociedade e para a comunidade científica.

Finalizamos com uma frase da oração de São Francisco que diz: **“Senhor, fazei de mim instrumento de vossa paz”**.

**Paz e bem!**

Annete Silva Faesarella

Fábio Andrijauskas

Laira Lucia Damasceno de Oliveira

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **A MODERN PANORAMA OF THE INTERNET OF MEDICAL THINGS DEMONSTRATING ITS APPLICATION LANDSCAPE**

Reinaldo Padilha França  
Ana Carolina Borges Monteiro  
Rangel Arthur  
Francisco Fambrini  
Julio Cesar Pereira  
Vicente Idalberto Becerra Sablón  
Yuzo Iano

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211051>

### **CAPÍTULO 2..... 20**

#### **PRODUÇÃO E APLICAÇÕES DO PÓ DA CASCA DE ROMÃ EM COSMÉTICOS**

Teresa de Jesus Estevam Pereira  
Vanessa Cristine de Marco Matos dos Santos  
Iara Lúcia Tescarollo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211052>

### **CAPÍTULO 3..... 36**

#### **IMAGENS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL EM ESTADO DE REPOUSO APLICADAS A ESTUDO DA DOR CRÔNICA UTILIZANDO DEEP LEARNING**

Sérgio Ricardo de Lima Novais  
Glaucilene Ferreira Catroli  
Fábio Andrijauskas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211053>

### **CAPÍTULO 4..... 50**

#### **BALSANET - PLATAFORMA COMPUTACIONAL MULTIPARÂMETROS CONTROLADA REMOTAMENTE PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS**

Kelvyn Souza Santana  
Anderson Quintino da Fonseca  
Vicente Idalberto Becerra Sablón  
Annete Silva Faesarella

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211054>

### **CAPÍTULO 5..... 67**

#### **NOVO MÉTODO DE SUPRIMENTO DE ELETROPOSTOS A PARTIR DE ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Fernando Luciano de Almeida  
Julio Cesar Galves Gomes Mangini Mosqueiro Junior  
Annete Silva Faesarella

Vicente Idalberto Becerra Sablón

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211055>

**CAPÍTULO 6..... 81**

**ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE SOLVENTES NA PRODUÇÃO DE ADESIVOS**

Leonardo Dorigo de Almeida  
Samyra Haryele Gimenes Silva  
Monica Tais Siqueira D'Amelio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211056>

**CAPÍTULO 7..... 97**

**DESENVOLVIMENTO, ANÁLISE E ESTUDO DA CASCA DE CAFÉ PARA REMOÇÃO DE CORANTES DE EFLUENTES INDUSTRIAIS**

Enik Erica Rodrigues Godoy  
Gabriela de Oliveira Ferri  
Monica Tais Siqueira D'Amelio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211057>

**CAPÍTULO 8..... 109**

**APLICAÇÃO DE CARVÃO ALTERNATIVO EM TRATAMENTO DE ÁGUA INDUSTRIAL**

Bruna Ferraz Mattos de Souza  
David Aguiar Ferreira Junior  
Monica Tais Siqueira D'Amelio Felipe

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211058>

**CAPÍTULO 9..... 123**

**ESTUDO DA TRANSFORMAÇÃO DO LODO GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM PRODUTO COMERCIAL AGRÍCOLA**

Jaqueline Paz de Oliveira  
Mislaini de Sá Viana  
André Augusto Gutierrez Fernandes Beati  
Renata Lima Moretto  
Laira Lúcia Damasceno de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9502211059>

**CAPÍTULO 10..... 145**

**AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL COM FOCO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Augusto da Silva Santos  
Brurenan Rocha Silva  
Geraldo Peres Caixeta

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110510>

**CAPÍTULO 11..... 163**

**ANÁLISE DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO E EFEITOS DE BLINDAGEM**

Rafaela Steffany da Silva Kayo  
William Aparecido de Oliveira  
Geraldo Peres Caixeta

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110511>

**CAPÍTULO 12..... 183**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE METAIS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

Cláudia Fernanda Spagnol Cocenza  
Yasmin Abrahão Pacheco Boiago  
Renato Franco de Camargo  
Roberta Martins da Costa Bianchi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110512>

**CAPÍTULO 13..... 202**

**LEVANTAMENTO DA CAUSA REFERENTE AOS DANOS E PATOLOGIAS ENCONTRADOS NA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA EM UMA VIA DE FLUXO MUITO PESADO**

Caroline Fernanda Ferreira  
Lillian Maria Destro  
Marcelo da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110513>

**CAPÍTULO 14..... 220**

**ANÁLISE DE GESTÃO DE OBRA E IMPACTO DE CIRCUNVIZINHANÇA**

Ana Carolina Marques Monteiro  
Letícia Toniato Andrade  
Laira Lúcia Damasceno de Oliveira  
Renata Lima Moretto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110514>

**CAPÍTULO 15..... 234**

**O DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES DE ENSINO FRENTE ÀS ESTRATÉGIAS ARQUITETÔNICAS, ENERGÉTICAS E OS IMPACTOS CLIMÁTICOS ATUAIS**

Jane Tassinari Fantinelli  
Mariana Cene da Silva  
Caroline Oliveira Tartari

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110515>

**CAPÍTULO 16..... 248**

**DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR DE OZÔNIO DE BAIXO CUSTO PARA**

## TRATAMENTO DE ÁGUA CONTAMINADA COM CORANTES

Leticia Pereira Brito D'Oliveira  
Marcos Vinicius Pernambuco Zeferino  
Roberta Martins da Costa Bianchi  
Renato Franco de Camargo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110516>

### **CAPÍTULO 17..... 268**

#### DETERMINAÇÃO DO TEOR DE LACTOSE POR MEIO DE GLICOSÍMETRO

Danka Ayres Carvalho da Silva  
Gabriel Luís Ehrenberg Malavazzi  
Filipe Alves Coelho  
Roberta Martins da Costa Bianchi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110517>

### **CAPÍTULO 18..... 280**

#### ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE IMPRESSÃO 3D NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE PEÇAS TÉCNICAS IMPRESSAS

Paulo Cesar Polli  
Daniel Loureiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110518>

### **CAPÍTULO 19..... 299**

#### DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DENTÁRIOS ATRAVÉS DA MANUFATURA ADITIVA

Guilherme de Faria Mendes  
Vinicius Fernandes Moreira Alves  
Daniel Loureiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.95022110519>

### **SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 320**

## ESTUDO DA VIABILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE METAIS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

### **Cláudia Fernanda Spagnol Cocenza**

Universidade São Francisco, Engenharia  
Química  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/8630283707527334>

### **Yasmin Abrahão Pacheco Boiagi**

Universidade São Francisco, Engenharia  
Química  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/2293474410122744>

### **Renato Franco de Camargo**

Universidade São Francisco, Engenharia  
Elétrica  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/2446780558301454>

### **Roberta Martins da Costa Bianchi**

Universidade São Francisco, Engenharia  
Química  
Campinas-SP  
<http://lattes.cnpq.br/1178282277362723>

**RESUMO:** Devido às novas tecnologias e à diminuição da durabilidade dos equipamentos eletroeletrônicos, nas quais, conseqüentemente, ocorre a geração de resíduos, observa-se a necessidade de recorrer aos métodos de reciclagem e de recuperação dos metais contidos nas placas de circuito impresso (PCI), uma vez que estas estão presentes na grande maioria dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE). Nesse contexto, em virtude da existência de diversas técnicas, este trabalho teve como objetivo apresentar os principais métodos de recuperação de metais em PCIs, como,

também, suas vantagens e desvantagens por meio de uma metodologia comparativa entre as bibliografias existentes. O método considerado o mais benéfico e viável, referente aos aspectos apresentados, sendo eles consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos, tempo de processo e custo operacional foi o processo biohidrometalúrgico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lixo eletrônico, PCI, resíduos, meio ambiente, recuperação de metais.

### STUDY OF THE VIABILITY OF RECOVERING METALS IN PRINTED CIRCUIT BOARDS

**ABSTRACT:** Faced with new technologies and the decrease in the durability of electronic equipment, in which, consequently, waste is generated, there is a need to resort to methods of recycling and recovery of metals contained in printed circuit boards (PCB), since these are present in the vast majority of electrical and electronic equipment (EEE). In this context, due to the existence of several techniques, this work aimed to present the main methods of metal recovery in PCBs, as well as their advantages and disadvantages through a comparative methodology between existing bibliographies. The method considered the most beneficial and viable, referring to the aspects presented, namely energy consumption, water consumption, waste generation, process time and operating cost was the biohydrometallurgical process.

**KEYWORDS:** Electronic waste, PCB, waste,

environment, metal recovery.

## 1 | INTRODUÇÃO

O crescimento populacional aliado ao poder aquisitivo e o avanço da tecnologia, vem sendo um dos causadores do aumento do consumo dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE) e, conseqüentemente, da diminuição da sua vida útil, também chamada de obsolescência programada. Ligados a estes fatores, quando estes EEEs sofrem algum tipo de dano são transformados em lixo eletrônico, conhecidos como resíduo de equipamento eletroeletrônico (REEE), já que, muitas vezes, comprar um aparelho novo é mais simples do que consertá-lo.

Em vista disso, a logística reversa tem grande importância neste cenário de pós consumo, uma vez que acompanha o produto desde sua venda até a sua volta à empresa que o vendeu, possibilitando, desta forma, o retorno de bens ou materiais novamente ao ciclo produtivo e, conseqüentemente, sendo reutilizados na fabricação de novos produtos. Desta forma, a fim de melhorar esta gestão dos REEE, várias diretrizes nacionais e internacionais foram criadas. A União Europeia (UE) foi pioneira nesse quesito, criando as diretivas *Waste Electrical and Eletronic Equipament (WEEE)* e a *Restriction of Certain Hazardous Substances (RoHS)*, ambas em 2006. Já no Brasil, existe a Norma Brasileira ABNT/NBR 10.004/2004, Lei Federal nº 12.305/2010 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Resolução CONAMA nº 401/2008, entre outras legislações.

Quando os REEEs são descartados no lixo comum, liberam produtos de caráter altamente tóxico, como, por exemplo, arsênio (As), cádmio (Cd), cobre (Cu), mercúrio (Hg), alumínio (Al) e chumbo (Pb), que possuem a capacidade de penetrar no solo, contaminando lençóis freáticos e, como consequência, a fauna, a flora e os seres humanos. Portanto, visando contribuir com a redução do impacto ambiental, inúmeras possibilidades vêm sendo desenvolvidas e aplicadas, além de metodologias de recuperação e de reciclagem, através de processos mecânicos, químicos e biotecnológicos, de metais preciosos ou não e de materiais poliméricos e cerâmicos que fazem parte da composição das sucatas tecnológicas.

Grande parte dos EEEs possuem Placas de Circuito Impresso (PCI) que representam 3% da totalidade do REEE produzido. A recuperação de metais preciosos através de resíduos de PCIs fez-se algo relevante e interessante do ponto de vista econômico, visto que estes metais fazem parte de, aproximadamente, 95% do valor total intrínseco das PCIs e suas concentrações, no REEE, podem ser até 10 vezes maiores que nos minérios (CALDAS *et al.*, 2015). Além disso, os benefícios vão desde a preservação de fontes de matéria-prima e redução do consumo de água e energia, como, também, a redução da emissão dos gases de efeito estufa (GEE), contribuindo, dessa forma, com a redução do

aquecimento global.

Nesse contexto, diante da existência de diversas técnicas de recuperação e de reaproveitamento das PCIs, este trabalho tem como objetivo apresentar os principais métodos de recuperação dos metais contidos nas PCIs, como também, suas vantagens econômicas, ambientais, eficiência e viabilidade, através de uma metodologia comparativa entre as bibliografias existentes.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Lixo Eletrônico

Os EEEs representam um conjunto de produtos que possuem circuitos ou partes elétricas com funcionamento através de fonte de alimentação ou bateria. Atualmente, estão presentes na maior parte das empresas e dos lares pelo mundo inteiro e referem-se desde equipamentos simples de cozinha até as tecnologias de informação e comunicação (TIC) mais modernas (FORTI, 2019).

Entretanto, quando o primeiro defeito de um equipamento eletrônico aparece e ao passo que novas tecnologias são disponibilizadas no mercado, trazendo vantagens a sociedade, observa-se a sua rápida substituição, contribuindo com o aumento de lixo eletrônico, também chamado de e-lixo, que muitas vezes, não dispõe de tratamento e disposição final correta (MOI *et al.*, 2012). A aquisição dos EEEs pode ser explicada pelo intuito do ser humano de atender às suas necessidades e pelo seu bem-estar, mas pode ser esclarecida, até mesmo, pelo fato de “quanto mais se tem, mais se deseja ter” e pela expansão do sistema capitalista (BASSI, LOPES, 2017). Todavia, nos últimos tempos, observa-se que o avanço tecnológico vem transformando produtos recém-anunciados e duráveis em produtos ultrapassados e obsoletos, resultado do plano competitivo que as indústrias têm mostrado, ou seja, a rapidez com que as tecnologias são inovadas (ROCHA *et al.*, 2010).

Através de estudos executados pelo programa ambiental da Organização das Nações Unidas (ONU), Caldas (2017), aponta que a geração mundial de REEE é cerca de 20 a 50 milhões de toneladas por ano e o seu avanço é três vezes maior que outros tipos de lixos urbanos. No Brasil, a média de geração de REEE é de 680 mil toneladas por ano e que o país descarta cerca de 10 milhões de computadores anualmente. A Figura 1 mostra a quantidade de e-lixo global, gerado por ano, além de uma projeção até o ano de 2030.

## E-lixo Global Gerado Por Ano

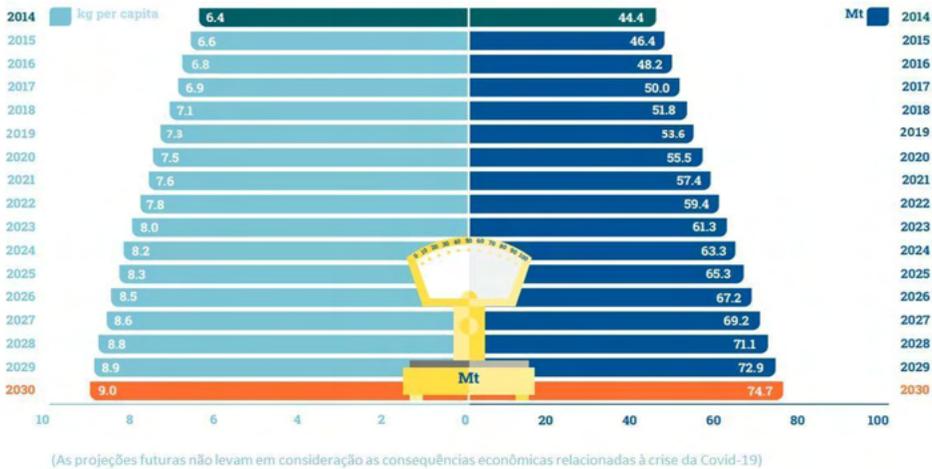


Figura 1 - Quantidade de e-lixo global gerado por ano

Fonte: Adaptado de Forti *et al.* (2020).

Contudo, quando os REEE são descartados em locais inapropriados, podem prejudicar o ecossistema, tanto pela manipulação direta das PCIs e de seus componentes, quanto acidentalmente, em razão dos equipamentos que são despejados nos aterros sanitários, contaminando a água e o solo, por meio de seus componentes tóxicos, como metais pesados, as substâncias halogenadas, os gases do efeito estufa, entre outros (ROCHA *et al.*, 2010).

## 2.2 Legislações Vigentes (Internacionais e Nacionais)

Constantemente, legislações ecossistêmicas são criadas e/ou alteradas de modo que compreenda distintas questões do ciclo de vida dos produtos que se apliquem às inúmeras etapas de logística reversa e tendendo a atribuir responsabilidades às organizações produtoras pelo equacionamento da volta dos produtos, assim que seus respectivos fins são declarados (LAVEZ *et al.*, 2011). Desta forma, Caldas (2017) sugere que uma opção para a destruição dos REEEs é o fato de países exportarem seus descartes para os países emergentes. Com o objetivo de impedir esta ação, criou-se a Convenção da Basileia, referente ao Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu armazenamento.

O continente europeu foi pioneiro na criação de debates sobre a política de destinação, de tratamento e de proibição de alguns materiais que fazem parte da composição dos EEEs. Em vista disso, a elaboração de diretivas foi discutida visando a normatização dos procedimentos relacionados à destinação e manuseio dos REEE. Como

estas diretivas foram criadas na Europa, elas possuíram repercussão mundial na produção de EEE (CALDAS, 2017). O Quadro 1 apresenta um resumo das principais legislações de vigência internacional, nacional e seus objetivos.

<b>Legislação Internacional</b>	<b>Objetivos</b>
<i>Waste Electrical and Electronic Equipment Directive (WEEE), 2006</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Responsabiliza a empresa pela disposição final de seus EEE, sem custo adicional ao seu cliente, abrangendo, desta forma, coleta, reciclagem, reutilização e recuperação além de visar a minimização do descarte dos REEEs; determina que cotas de reciclagem e de recuperação de e-lixo sejam alcançadas;</li> <li>Incentiva à reciclagem e à proibição de disposição inapropriada.</li> </ul>
<i>Restriction of Certain Hazardous Substances (RoHS), 2006</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limita a utilização de chumbo, mercúrio, cádmio, cromo hexavalente, bifenilspolibromados (PBBs) e éteres difenil-polibromados (PBDEs)</li> <li>Obriga, ao mínimo, 27 países do continente europeu a seguirem suas regulamentações técnicas, além de contemplar a gestão de produtos, de métodos de produção e de processos, englobando indústrias têxteis, de calçados e de couro.</li> <li>Deve ser seguida por aqueles países que exportam seus produtos para a União Europeia.</li> </ul>
<b>Nacional</b>	
Norma brasileira ABNT/NBR 10.004/2004	<ul style="list-style-type: none"> <li>Classifica os resíduos sólidos de acordo com seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde humana, para que possam ser gerenciados de forma adequada.</li> </ul>
Lei Federal 12.305/2010 Política Nacional de Resíduos Sólidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cria diretrizes relacionadas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos às responsabilidades dos geradores e do Poder Público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.</li> </ul>
Lei Estadual (SP) 13.576/2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cria metodologias e normas para a reciclagem, gerenciamento e disposição final de REEE.</li> </ul>

Quadro 1 - Resumo das principais legislações internacionais em vigência.

Fonte: Adaptado de Caldas (2017).

### 2.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

A PNRS, instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, mostra-se como uma importante ferramenta para a população brasileira, uma vez que estabelece diretrizes para a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a destinação final adequada para os resíduos sólidos gerados, minimizando os impactos ambientais (DEMAJOROVIC; MIGLIANO, 2013).

Do mesmo modo, a gestão integrada de resíduos sólidos são ações direcionadas para as dimensões econômica, política, social, cultural e ambiental, voltadas para o desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2012). Assim, devem-se reconhecer como

responsáveis pelo cumprimento de tais exigências os fabricantes, comerciantes, consumidores, dentre outros (MOI *et al.*, 2012). Conforme ressaltam Demajorovic e Migliano (2013), a lei também estimula a incorporação dos catadores de recicláveis em iniciativas para o aumento da coleta e destinação final de resíduos, reconhecendo-os como um grupo fundamental para a efetiva realização.

Segundo a estratégia da PNRS, pode-se citar como um de seus objetivos, de acordo com o Art. 7º, inciso II, medidas para: “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2012, p. 13). Portanto, ainda que haja diversos desafios e esforços para o efetivo cumprimento da legislação, esta representa um grande avanço para o gerenciamento de resíduos sólidos, além de um compromisso com o meio ambiente.

## 2.4 A Importância da Logística Reversa

Cada vez mais, as empresas estão sendo responsabilizadas pelo ciclo integral de seus produtos, incluindo o seu descarte. Os produtos descartados possuem, usualmente, substâncias perigosas à saúde e ao meio ambiente e, diante disto, um seríssimo problema que começou a ganhar visibilidade nos debates é a destinação final que esses e-lixos recebem (LAVEZ *et al.*, 2011). Neste cenário, a logística reversa se mostra importante, tornando possível o retorno de bens ou materiais ao ciclo produtivo (SILVA, 2019).

O Art. 3º, inciso XII, da PNRS (BRASIL, 2012, p. 11), apresenta como definição da logística reversa o seguinte:

[...] instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

A logística reversa de pós-consumo assume papel importante auxiliando o gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos, além de possibilitar a reutilização e a reciclagem, já que diminui a quantidade deste tipo de lixo em aterros sanitários. Entretanto, para a efetiva implantação da logística reversa é necessário a conscientização dos fabricantes, recebendo os equipamentos obsoletos, mas, também, dos consumidores para que não descartem em lixo comum e sim destinem os equipamentos em desuso aos pontos de coleta (LIMA, 2015).

## 2.5 Impactos ao Meio Ambiente e à Saúde

Mundialmente, considera-se que houve um aumento na procura e na compra de EEEs e é visível que esta demanda continuará crescendo, conseqüentemente, aumentará a quantidade de e-lixo, que por sua vez, quando descartados de forma incorreta, vão para lixos comuns ou em lixões, acarretando danos e agravos à natureza e à saúde humana

devido aos metais pesados que fazem parte da sua composição e que são encontrados, principalmente, nas PCIs (TANAUE *et al.* 2015).

A toxicidade e a bioacumulação são as principais características que levam os metais pesados a serem considerados como perigosos. Os danos gerados através do contato com estas substâncias são graves e, na maioria das vezes, irreversíveis. Desta forma, é extremamente importante que ações sejam sistematizadas e tomadas para que os danos gerados pela coleta, segregação e disposição inapropriadas sejam eliminados (TANAUE *et al.* 2015; KEMERICH *et al.*, 2013).

Os principais efeitos negativos à saúde humana causados pelos materiais tóxicos, presentes no lixo eletrônico, estão descritos no Quadro 2.

Componente	Efeito na saúde	Onde é usado?
Chumbo (Pb)	Causa danos ao sistema nervoso (central e periférico), endócrino e sanguíneo, alucinações, insônia, raciocínio lento, irritabilidade.	Processo de solda das PCIs, computador, celular, televisão, vidro das lâmpadas elétricas e fluorescentes
Mercúrio (Hg)	Quando na água, o Hg transforma-se em metilmercúrio e este é capaz de se acumular nos organismos vivos. Causa danos cerebrais, problemas no fígado, distúrbios no estômago, nos rins e no sistema nervoso, mutações nos genes e no metabolismo.	Computador, TV de tela plana e celular
Cádmio (Cd)	Este metal é absorvido através da respiração e da ingestão. Possui danos irreversíveis. Metal de caráter cancerígeno. Causa envenenamento, danos aos ossos, rins, pulmões, afeta o sistema nervoso, provoca dores reumáticas e problemas nos pulmões.	Computador, monitores de tubo antigos, bateria de <i>notebooks</i>
Arsênio (As)	Metal de caráter cancerígeno. Causa doenças de pele, prejudica o sistema nervoso e pode causar câncer no pulmão.	Celular

Quadro 2 - Materiais tóxicos presentes no lixo eletrônico e seus efeitos.

Fonte: Adaptado de Favera (2008), MOI *et al.* (2012) e Zeni *et al.* (2012)

## 2.6 Placas de Circuito Impresso (PCI)

As PCIs são placas que variam de tamanho e de componentes de acordo com o EEE no qual serão empregadas e são feitas de materiais poliméricos (30%), cerâmicos (30%) e metálicos (40%) e possuem uma ou mais camadas de cobre. Este metal, por sua vez, é um material com excelente condutividade elétrica e ótimas propriedades mecânicas (CALDAS, 2017; MEHL, 2011; SILVAS, 2014). Pode-se dizer que as PCIs têm o objetivo de fixar os componentes eletrônicos que compõem o circuito e, através das trilhas condutoras em cobre, possibilitam as conexões que estabelecem o contato elétrico, sendo usadas em

diversos produtos eletrônicos. (SILVA, 2019).

Atualmente, as PCIs fabricadas a partir da fibra de vidro são mais utilizadas, quando em comparação com as PCIs fabricadas a partir de fenolite, visto que a primeira possui ótima capacidade isolante e estabilidade dimensional. (MEHL, 2011). De acordo com Caldas (2017), a obtenção de metais através da mineração e a exploração dos recursos naturais causam consequências ao meio ambiente devido à contaminação da água, ar e solo. Além do mais, tais recursos naturais propendem a ficar cada vez mais escassos, tornando viável, no aspecto técnico, financeiro e econômico, a recuperação dos metais, através dos REEEs.

## 2.7 Métodos para Recuperação de PCIs

O não reaproveitamento dos REEE implica em um desaproveitamento de recursos naturais não renováveis (ZENI et al., 2012), assim, a reciclagem dos REEE, principalmente, das PCIs, se torna atrativa econômica e ambientalmente, devido aos diversos constituintes metálicos que podem ser recuperados (GOUVEIA, 2014). No Brasil, o processo mecânico tem sido utilizado para recuperar e reciclar metais presentes nas PCIs. Entretanto, na maioria das vezes, estes materiais são enviados para outros países, como EUA e Suíça (LOGREVERSA, 2020), devido ao baixo custo com o processo de exportação (Pafume et al. 2020).

Deste modo, um exemplo sustentável de reaproveitamento foi observado nas Olimpíadas de Tóquio 2020. As 5000 medalhas olímpicas e paraolímpicas (Figura 2) de ouro, de prata e de bronze foram produzidas 100% a partir da recuperação de, aproximadamente, 79 toneladas de dispositivos eletrônicos, como telefones celulares usados, arrecadados no Japão. Além disso, a quantidade final de metais extraídos foi cerca de 32 kg de ouro, 3500 kg de prata e 2200 kg de bronze (*THE TOKYO ORGANISING COMMITTEE OF THE OLYMPIC AND PARALYMPIC GAMES*, 2020).



Figura 2 - Medalhas dos Jogos de Tóquio 2020.

Fonte: *The Tokyo Organising Committee of the Olympic and Paralympic Games* (2020).

Diante da importância da reciclagem e recuperação dos metais constituintes das PCIs, faz-se necessário entender e conhecer os métodos que viabilizam essas práticas. Assim, destacam-se os processos mecânico, pirometalúrgico, eletrometalúrgico, hidrometalúrgico e o biometalúrgico.

### *2.7.1 Processo Mecânico*

O processo mecânico é o mais utilizado no Brasil, devido ao baixo custo do processo. Neste tipo de reciclagem, um pré-tratamento é realizado para separar os materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos. Tal separação refere-se à associação de um ou mais procedimentos, como cominuição e classificação dos materiais, para que todo o volume descartado possa ser reaproveitado (GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

### *2.7.2 Pirometalurgia*

A pirometalurgia consiste na volatilização de impurezas, através de processos como a incineração, pirólise, fusão, dentre outros, desta forma, os metais ficam concentrados em escórias, possibilitando posteriormente o refino (GOUVEIA, 2014). De acordo com Gerbase e Oliveira (2012), neste método, aplicam-se elevadas temperaturas, possibilitando a produção de metais puros, ligas e, até mesmo, compostos intermediários. Na pirometalurgia, o objetivo é concentrar metais em uma única fase e descartar os materiais que não são classificados como metais. A maneira mais habitual de retirar os polímeros e materiais não metálicos encontrados juntos aos materiais metálicos é através da queima ou da incineração. Tal método é bastante empregado nos processos de reciclagem de metais preciosos (VIVAS; COSTA, 2013).

### *2.7.3 Eletrometalurgia*

O processo eletrometalúrgico realiza o refino dos metais a partir da eletrólise e seu princípio baseia-se nas reações de oxirredução não espontâneas, na qual o material presente é dissolvido na forma de íon metálico e eletrodepositado no cátodo (GERBASE; OLIVEIRA, 2012). De acordo com Kasper (2016), a eletrometalurgia é dividida em duas técnicas diferentes: eletro-obtenção e o eletro-refino. A primeira é empregada na fabricação primária de metais obtidos através de processos de lixiviação, enquanto que, a segunda é utilizada para obter metais puros a partir da dissolução anódica seguida da redeposição catódica do metal desejado.

### *2.7.4 Hidrometalurgia*

A hidrometalurgia abrange processos de lixiviação, ácida ou básica, a fim de

solubilizar os metais do estado sólido para o estado líquido e processos de purificação, nos quais são concentrados os metais relevantes e também retiradas as impurezas mediante extração por solventes e adsorção (GOUVEIA, 2014 e JORGE, 2019). Neste método, duas lixiviações são realizadas: a primeira é realizada com ácidos, tais como ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>); a segunda lixiviação, normalmente, é realizada com água-régia, cianeto, tioureia, tiosulfato ou halogenetos (KASPER, 2016). A fim de obter seletividade durante o processo, pode haver a combinação dos agentes de lixiviação (SILVAS, 2014). Contudo vale ressaltar que no momento da escolha do agente lixiviante ideal, deve ser considerando os aspectos econômicos, disponibilidade, toxicidade, entre outros (GOUVEIA, 2014 e JORGE, 2019).

### 2.7.5 Biohidrometalurgia (Biometalurgia)

A biometalurgia ocorre a partir das interações entre os metais e os microrganismos (GERBASE; OLIVEIRA, 2012; ZENI et al., 2012). Os microrganismos mais utilizados são *Leptospirillum ferrooxidans*, a *Acidithiobacillus thiooxidans* e a *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Entretanto, existem outras espécies de microrganismos que são utilizados, como *Metallogenium sp.*, *Sulfolobos acidocaldarius*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *Crenothrix sp.*, *Leptothrix sp.* e *Gallionella sp.* Logo, para que se atinja maiores resultados, várias espécies são capazes de serem utilizadas ao mesmo tempo, no mesmo processo (SILVAS, 2014). Deste modo, o processo biometalúrgico, pode promover uma recuperação seletiva de metais, pois os microrganismos podem ligar sua superfície celular aos metais ou os transportarem para o meio intracelular (GOUVEIA, 2014). Este método encontra-se dividido em biolixiviação, na qual a recuperação de metais acontece devido aos sulfuretos metálicos e a biossorção, cuja extração é realizada devido às interações físico-químicas, utilizando-se materiais biológicos (JORGE, 2019).

## 3 | MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma revisão da literatura, por meio da base de dados periódicos da Capes e *Google Acadêmico*. As palavras chaves para consulta foram recuperação de metais em PCIs e lixo eletrônico.

Os quatro principais processos de recuperação identificados durante a pesquisa foram: pirometalúrgico, eletrometalúrgico, hidrometalúrgico e biometalúrgico e classificados numa escala numérica de 1 à 3, na qual o número 3 representou o processo mais viável e o número 1, o menos viável. Dessa forma, o método que obteve o maior somatório foi considerado o mais benéfico, de acordo com os aspectos analisados, sendo: (i) consumo de energia, (ii) consumo de água, (iii) geração de resíduos, (iv) tempo de processo e (v) custo operacional. Ao final, apresentou-se o percentual de recuperação de diferentes

metais que compõem as PCIs, obtidos por diferentes autores, através das principais técnicas existentes.

#### 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

As PCIs são consideradas heterogêneas por apresentarem diversos constituintes, fibra de vidro (30%), resina epóxi (15%), cobre (32,5%), alumínio (3,73%), ferro (1,42%), estanho (0,96%), (Silvas 2014 e Zeni et al. 2012), tornando sua reciclagem complexa. Dessa forma, ao escolher um processo de reciclagem, vários aspectos devem ser considerados, visto que, alguns processos podem ser mais perigosos à saúde humana e à natureza.

O primeiro aspecto a ser considerado é o consumo de energia, de acordo com Vivas e Costa (2013), a hidrometalurgia e a biohidrometalurgia são processos muito semelhantes e têm como vantagem a não necessidade de utilizar recursos energéticos significativos, como, geradores de energia. A pirometalurgia, comparada a estes dois processos, possui uma demanda extremamente alta, uma vez que são necessárias enormes quantidades de energia para que altas temperaturas sejam atingidas. O processo eletrometalúrgico também demandam certa quantidade de energia, entretanto, comparado à pirometalurgia, torna-se baixa.

A Figura 3 apresenta a escala de classificação dos processos, na qual 1 é pouco vantajoso e 3 é vantajoso.

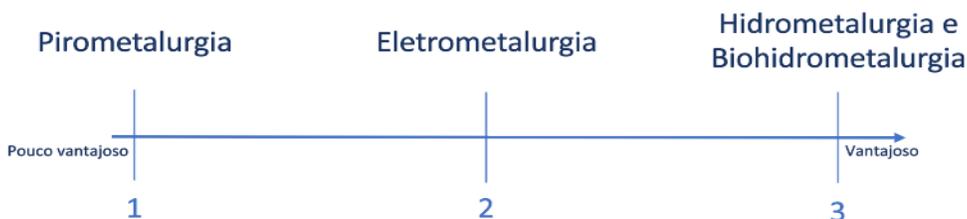


Figura 3 - Consumo de energia.

Fonte: Próprio autor

Outro fator importante é o consumo de água durante os processos. Nas experiências descritas por Vivas e Costa (2013), nos processos biohidrometalúrgicos e hidrometalúrgicos o consumo de água é volumoso, visto que são métodos que empregam grande quantidade de líquidos em sua execução. Entretanto, na pirometalurgia, a utilização de água usada no resfriamento de equipamentos e de caldeiras é menor, além disso, é reaproveitada durante o processo. Na eletrometalurgia, a água também é utilizada em quantidades menores,

porém, não é reaproveitada. Sendo assim, tem-se a seguinte escala (Figura 4).

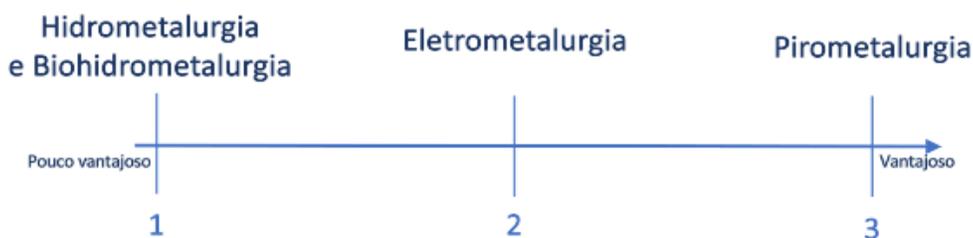


Figura 4 - Consumo de água.

Fonte: Próprio autor

A geração de resíduos é um aspecto que deve ser levado em consideração por apresentar produtos tóxicos. Segundo Vivas e Costa (2013), na hidrometalurgia são gerados efluentes líquidos contendo metais tóxicos e corrosivos, no entanto, resíduos gasosos e sólidos são quase inexistentes neste processo. No processo biohidrometalúrgico resíduos sólidos, líquidos ou gasosos não são gerados. Já a eletrometalurgia não gera resíduos expressivos ou relevantes, inclusive, os eletrólitos gerados por este segundo processo podem ser reutilizados em outros processos de reciclagem. A pirometalurgia, através da queima de polímeros e de outros materiais isolantes, emite na atmosfera uma grande quantidade de poluição, como, por exemplo, dioxinas e furanos. Além destes resíduos gasosos, são gerados resíduos sólidos de árdua reciclagem, entre estes, escórias de materiais cerâmicos, metais e polímeros com elevada dificuldade de reciclagem. Desta forma, tem-se a seguinte escala (Figura5).

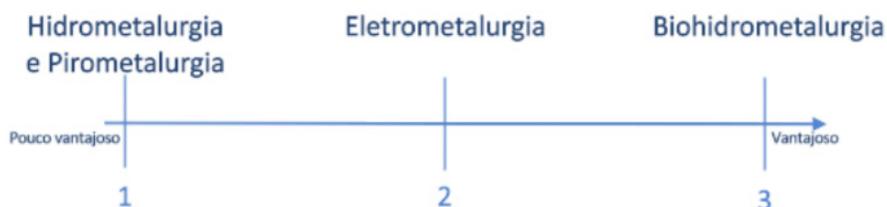


Figura 5 - Geração de resíduos.

Fonte: Próprio autor

Vivas e colaboradores (2013), observou que o tempo de processo no método hidrometalúrgico necessita de extensas etapas de lixiviação e alta exposição do metal à solução lixivadora para que a eficiência seja alta. Além disso, antes do início das

etapas de lixiviação, um pré-tratamento mecânico é necessário, o qual envolve etapas de desmantelamento (desmontagem seletiva). Segundo Kasper (2016), o pré-tratamento visa aumentar a eficiência da lixiviação e reduzir a quantidade de agente lixiviante utilizado. Desta forma, tal processo, como também o método biohidrometalúrgico, requerem semanas ou até meses para que ocorra a recuperação dos metais presentes nos lixos eletrônicos. Como alternativa, os processos pirometalúrgicos não demandam a realização de pré-tratamentos, podendo ser aplicados a qualquer tipo de e-lixo, possuindo poucas etapas. A eletrometalurgia, da mesma forma, não exige várias etapas para que 100% dos metais desejados sejam capazes de ser dissolvidos (VIVAS; COSTA, 2013). Assim, os métodos foram classificados quanto a tempo de processo (Figura), em:

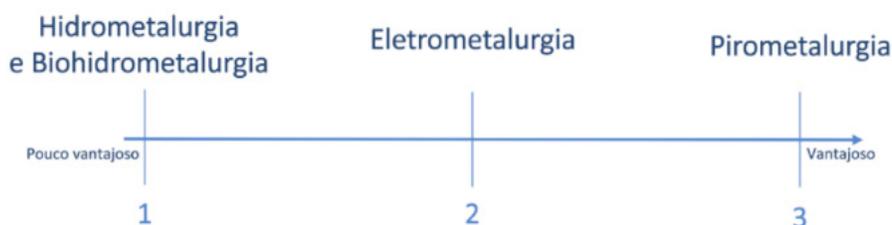


Figura 6 - Aspecto: Tempo de processo.

Fonte: Próprio autor

Destaca-se ainda que, o custo operacional é outro aspecto extremamente relevante. Diante disso, a biometalurgia é considerada um dos métodos mais atuais e promissores. Este processo abrange a biolixiviação, apresentando diversas vantagens, como: (i) baixo custo operacional, (ii) economia de insumos, (iii) baixo investimento inicial e (iv) baixo consumo energético quando comparado ao processo pirometalúrgico, já que este último processo requer um elevado consumo de energia e necessita de um alto investimento de implantação. A biometalurgia abrange, também, a biossorção, que oferece muitas vantagens, dentre elas: (i) baixo custo de operação e (ii) redução da quantidade de produtos químicos (ZENI *et al.* 2012).

Segundo Zeni e colaboradores (2012), quando comparado a outros processos, as maiores vantagens do processo hidrometalúrgico são: (i) separação mais simples entre os componentes e (ii) custos mais baixos. As vantagens da eletrometalurgia, quando comparada aos processos pirometalúrgicos, são: (i) poucas etapas e (ii) alta concentração de metais preciosos, que equivalem de 95 a 97% dos metais contidos nos resíduos. Sendo assim, tem-se a seguinte escala (Figura 7).

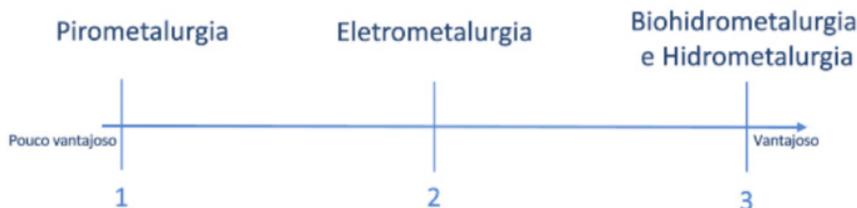


Figura 7 - Custo operacional.

Fonte: Próprio autor

O método que obteve o maior somatório (Tabela 1), sendo considerado o mais benéfico e viável, foi o processo biohidrometalúrgico.

Processo de recuperação	Consumo de energia	Consumo de água	Geração de resíduos	Tempo de processo	Custo operacional	Somatório
Pirometalúrgico	1	3	1	3	1	9
Eletrometalúrgico	2	2	2	2	2	10
Hidrometalúrgico	3	1	1	1	3	9
Biohidrometalúrgico	3	1	3	1	3	11

Tabela 1 - Somatório dos aspectos apresentados por processo.

Fonte: Próprio autor

Referente ao percentual de recuperação, vários estudos que contemplam métodos e metais recuperados diferentes foram analisados. De acordo com Silvas (2014), realizou-se duas etapas de extração sólido/líquido no método hidrometalúrgico, a primeira foi em meio sulfúrico e a segunda em meio sulfúrico oxidante, a extração de cobre foi de 100% e o fator de recuperação foi de 98,46%, o qual representou 32 kg de cobre para 100 kg de PCI. Em outra metodologia, apresentada por Martins (2007), a partir de processos que envolvem lixiviação ácida, com uma solução de 3,0N HCl + 1,0N HNO<sub>3</sub>, foi possível recuperar 86% de Sn. Já, a rota hidrometalúrgica utilizada por Caldas *et al.* (2015), incluiu a lixiviação em ácido sulfúrico a 75°C por 18 horas, lixiviação em ácido sulfúrico em meio oxidante a 75°C por 6 horas e lixiviação em ácido nítrico a temperatura ambiente por 2 horas, dessa forma, foi possível uma recuperação de 96,6% de prata.

Silvas (2014) alcançou, a partir de um processo biohidrometalúrgico, utilizando uma cepa bacteriana composta por três espécies microbianas: *Leptospirillum ferrooxidans*, a *Acidithiobacillus thiooxidans* e a *Acidithiobacillus ferrooxidans*, 100% para a extração de cobre, utilizando 2% de densidade de polpa e 100% de inóculo e o fator de recuperação de 100%, o qual representou 32,5 kg de cobre para 100 kg de PCI. Já, Brandl *et al.* (2001)

utilizaram microrganismos no processo de lixiviação dos metais que foram obtidos por meio do e-lixo. Bactérias das espécies *Thiobacillus thiooxidans* e *T. ferrooxidans* e fungos da espécie *Aspergillus niger* e *Penicillium simplicissimum* foram capazes de serem cultivados na existência de lixo eletrônico. Como resultado, pode-se citar que, em locais onde as concentrações de e-lixo foram entre 5 a 10 g/L, as bactérias foram capazes de lixiviar mais de 90 % de, Zn, Ni, Al e Cu. Enquanto isso, as duas espécies de fungos estimularam a recuperação de 65 % de Sn e Cu e mais de 95 % de Pb, Zn, Al e Ni.

Outro estudo realizado por Urbanski et al. (2000) mostrou que, a partir de técnicas de eletro-obtenção com soluções de pH ácido de tiourea e álcool, em uma temperatura de 60°C, pode-se obter uma recuperação de 96-100% de ouro. Já, no estudo realizado por Vegliò et al. (2003), o autor submeteu materiais residuais à microscopia eletrônica de varredura (MEV), raio x e análise química para que os mesmos pudessem ser caracterizados. Logo após a lixiviação destes materiais, os autores submeteram as amostras a um processo de eletro-obtenção visando a recuperação de cobre e níquel e obtiveram, no cátodo, 94-99 % da massa inicial destes dois elementos químicos.

Na Tabela 2, tem-se um resumo do percentual de recuperação de cada metal, por metodologia e por autor.

<b>Autor</b>	<b>Metodologia Utilizada</b>	<b>Metal Recuperado</b>	<b>Percentual de Recuperação</b>
Silvas (2014)	Hidrometalurgia	Cobre	98,46%
Martins (2007)	Hidrometalurgia	Estanho	86%
Caldas et al. (2015)	Hidrometalurgia	Prata	96,60%
Silvas (2014)	Biohidrometalurgia com bactérias	Cobre	100%
	Biohidrometalurgia com bactérias	Zinco, Níquel, Alumínio e Cobre	> 90%
Brandl et al. (2001)	Biohidrometalurgia com fungos	Estanho e Cobre	65%
		Chumbo, Zinco, Alumínio e Níquel	> 95%
Urbanski et al. (2000)	Eletrometalurgia	Ouro	96 - 100%
Vegliò et al. (2003)	Eletrometalurgia	Cobre e Níquel	94 - 99%

Tabela 2 - Percentual de recuperação de cada metal.

Fonte: Próprio autor

De acordo com Pafume e colaboradores (2020), as maiores dificuldades envolvidas na criação de uma unidade de reciclagem dos metais de PCI tratam-se do (i) investimento inicial extremamente elevado, uma vez que o processo exige muita complexidade, (ii) da exigência de grande área para instalação e (iii) do controle de emissões de gases e de poluentes (metais pesados e substâncias cancerígenas). Aliás, a complexidade do

processo será diretamente proporcional à quantidade de metais que possuem o interesse de recuperação. Em vista disso, o Brasil deixa de ganhar diversas divisas uma vez que não dispõe de uma usina recicladora de metais de PCI, que, mesmo exigindo um alto investimento inicial, é uma operação extremamente lucrativa.

## 5 | CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou o expressivo aumento de lixo eletrônico decorrente da rápida substituição dos equipamentos eletroeletrônicos, cujo descarte dos resíduos gerados, muitas vezes, não é adequado. Dessa forma, pôde-se perceber a importância da conscientização em relação à reciclagem e à recuperação dos metais contidos nas PCIs, minimizando-se os impactos socioambientais, sendo observados através da redução dos gases de efeito estufa que contribui com a redução do aquecimento global, como, também, da preservação de fontes de matéria-prima, da diminuição do gasto com aterros sanitários e da redução no gasto de energia.

Para atingir-se uma compreensão das técnicas existentes, apresentou-se as principais características dos métodos aplicados na recuperação dos metais presentes nas PCIs. A biohidrometalurgia apresentou-se como a mais promissora das tecnologias utilizadas na recuperação de metais das PCIs. O procedimento mais conhecido e utilizado no Brasil é o processo mecânico, devido ao seu baixo custo.

O método considerado o mais vantajoso, referente aos aspectos apresentados, sendo eles consumo de energia, consumo de água, geração de resíduos, tempo de processo e custo operacional, foi o processo biohidrometalúrgico.

## REFERÊNCIAS

BRANDL, H; BOSSHARD, R; WEGMANN, M. **Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi**. Hydrometallurgy, [S.L.], v. 59, n. 2-3, p. 319-326, fev. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X00001882>. Acesso em: 26 out. 2020.

BASSI, Maria Carolina Pohlinc Cabral; LOPES, Claudia Cristina. **A Sociedade do Consumo E Suas Consequências Socioambientais**. p. 100-125, 2017. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.edu/cadernopaic/article/view/251>. Acesso em: 15 maio 2020.

BRASIL. [Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010]. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. – 2. ed. – Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. (Série legislação; n. 81). Disponível em: [https://www.poli.usp.br/wpcontent/uploads/2018/10/politica\\_residuos\\_solidos.pdf](https://www.poli.usp.br/wpcontent/uploads/2018/10/politica_residuos_solidos.pdf). Acesso em: 3 maio 2021.

CALDAS, Marcos Paulo Kohler. **Síntese de nanopartículas de prata a partir da reciclagem de placas de circuito impresso**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-20072017-151234/en.php>. Acesso em: 26 maio 2021.

CALDAS, Marcos Paulo Kohler; MORAES, Viviane Tavares de; JUNCA, Eduardo; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares; ESPINOSA, Denise Croce Romano. **Reciclagem de Placas de Circuito Impresso Visando Recuperação de Prata: Estudo de uma Rota Hidrometalúrgica**. Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 102-108, 2015. Editora Cubo.

DEMAJOROVIC, Jacques; MIGLIANO, João Ernesto Brasil. **Política nacional de resíduos sólidos e suas implicações na cadeia da logística reversa de microcomputadores no Brasil**. Gestão & Regionalidade, v. 29, n. 87, p. 64-80, set-dez, 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=133429359006>. Acesso em: 20 maio 2021.

FAVERA, Eduardo Ceretta Dalla. **Lixo eletrônico e a sociedade**. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: [https://www.mobilizadores.org.br/wp-content/uploads/2014/05/artigo\\_favera.pdf](https://www.mobilizadores.org.br/wp-content/uploads/2014/05/artigo_favera.pdf). Acesso em: 15 maio 2021.

FORTI, Vanessa. **O crescimento do lixo eletrônico e suas implicações globais**. Panorama Setorial da Internet, v. 4, p. 1-20, dez. 2019. Disponível em: <https://cetic.br/media/docs/publicacoes/6/20191211170920/panorama-setorial-xi-4-lixo-eletronico.pdf>. Acesso em: 4 maio 2021.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential**. 2020. Disponível em: [http://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM\\_2020\\_def\\_dec\\_2020-1.pdf](http://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM_2020_def_dec_2020-1.pdf). Acesso em: 4 maio 2021.

GERBASE, Annelise Engel; OLIVEIRA, Camila Reis de. **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Química Nova, Porto Alegre, v. 35, n. 7, p. 1486-1492, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/qn/v35n7/v35n7a35.pdf>. Acesso em: 05 maio 2021.

GOUVEIA, André Redondo. **Recuperação de metais de placas de circuito impresso por via hidrometalúrgica**. Orientador: Joana Maia Moreira Dias. 2014. 63 f. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto, Portugal, 2014.

JORGE, António Sérgio Sousa. **Recuperação de cobre em Placas de Circuito Impresso: Lixiviação por percolação usando uma solução amoniaca**. Orientador: Sílvia Cardinal Pinho. 2019. 63 f. Tese (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, Porto, 2019.

KASPER, Angela Cristina. **Aplicación de técnicas de hidrometalurgia y electrometalurgia a la recuperación de oro de placas de circuitos de teléfonos móviles**. 2016. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidad Politécnica de València e Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

KEMERICH, Pedro Daniel da Cunha; MENDES, Sabrina Altmeyer; VORPAGEL, Tatiane Hohm; PIOVESAN, Maurício. **Impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada de lixo eletrônico no solo**. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 10, n. 2, p. 208-219, mar./abr. 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/286283387\\_Impactos\\_ambientais\\_decorrentes\\_da\\_disposicao\\_inadequada\\_de\\_lixo\\_eletronico\\_no\\_solo](https://www.researchgate.net/publication/286283387_Impactos_ambientais_decorrentes_da_disposicao_inadequada_de_lixo_eletronico_no_solo). Acesso em: 30 maio 2021.

LAVEZ, Natalie; SOUZA, Vivian Mansano de; LEITE, Paulo Roberto. **O Papel da Logística Reversa no Reaproveitamento do “Lixo Eletrônico” – Um Estudo no Setor de Computadores.** Revista de Gestão Social e Ambiental, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 15-32, 6 jul. 2011. Disponível em: [http://www.clrb.com.br/portal/us/arg/09\\_REVISTA%20GESTO%20SOCIAL%20E%20AMBIENTAL%202011\\_0.pdf](http://www.clrb.com.br/portal/us/arg/09_REVISTA%20GESTO%20SOCIAL%20E%20AMBIENTAL%202011_0.pdf). Acesso em: 03 jun. 2021.

LIMA, Anna Flávia de Oliveira et al. **Gestão de resíduos eletroeletrônicos e seus impactos na poluição ambiental.** Latin American Journal of Business Management. v. 6, n. 2, p. 109-126, jan-jun/2015.

LOGREVERSA. **Reciclagem de lixo eletrônico no Brasil.** 2020. Disponível em: <https://logreversa.com.br/reciclagem-de-lixo-eletronico/>. Acesso em: 30 out. 2021.

MARTINS, Afonso Henriques. **Recuperação de estanho e cobre a partir da reciclagem de placas de circuito eletrônico de microcomputadores sucataados.** Estudos Tecnológicos, v. 3, n. 2, p. 124-131, set. 2007. Disponível em: [http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos\\_tecnologicos/article/view/5735/2934](http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos_tecnologicos/article/view/5735/2934). Acesso em: 03 jun. 2021.

MEHL, E. L. de M.. **Conceitos Fundamentais Sobre Placas De Circuito Impresso.** 2011. Disponível em: [http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI\\_Conceitos\\_fundamentais.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf) Acesso em: 24 maio 2021.

MOI, Paula Cristina Pedrosa *et al.* **Lixo eletrônico: consequências e possíveis soluções.** CONNECTION LINE-Revista Eletrônica do UNIVAG, n. 07, p. 37-45, 2012. Disponível em: <http://periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/view/105/390>. Acesso em: 07 abr. 2021.

PAFUME, Robson; MARTINS, Harley Moraes; SILVA, Hudson Santos da; PEREIRA, Gustavo Simas. **Panorama da Reciclagem de Eletroeletrônicos No Brasil.** In: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 3., 2020, Gramado. 2020. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/II-007.pdf>. Acesso em: 27 out. 2021.

ROCHA, Adilson Carlos da; CERETTA, Gilberto Francisco; CARVALHO, Andriele de Prá Carvalho. **Lixo eletrônico: um desafio para a gestão ambiental.** Revista Technoeng, Paraná, v. 1, n. 2, p. 35-49, dez. 2010. Disponível em: <http://cescage.com.br/revistas/index.php/RTE/article/view/755>. Acesso em: 07 abr. 2021.

SILVA, Emanuel Carlos Santana da. **Placas de circuito impresso: levantamento da composição.** 2019. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40353>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SILVAS, Flávia Paulucci Cianga. **Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso.** 2014. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-28082015\\_114810/en.php](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-28082015_114810/en.php). Acesso em: 19 maio 2021.

TANAUE, Ana Claudia Borlina; BEZERRA, Deivid Mendes; CAVALHEIRO, Luana; PISANO, Lilian Cristiane. **Lixo Eletrônico: Agravos à Saúde e ao Meio Ambiente.** Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde. vol. 19, núm. 3, 2015, pp. 130-134 Universidade Anhanguera, Campo Grande, Brasil, 2015.

The Tokyo Organising Committee Of The Olympic and Paralympic Games. **Tokyo 2020 Olympic Medals**. 2020. Disponível em: <https://olympics.com/tokyo-2020/en/games/olympics-medals/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

URBANSKI, T.S; FURNARI, P; ABBRUZZESE, C. **Gold electrowinning from aqueous– alcoholic thiourea solutions**. Hydrometallurgy, [S.L.], v. 55, n. 2, p. 137-152, mar. 2000.

VEGLIÒ, F; QUARESIMA, R; FURNARI, P; UBALDINI, S. **Recovery of valuable metals from electronic and galvanic industrial wastes by leaching and electrowinning**. Waste Management, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 245-252, jan. 2003. Elsevier BV.

VIVAS, Renato de Castro; COSTA, Flávio Pietrobon. **Tomada de Decisão na Escolha do Processo de Reciclagem e Recuperação de Metais Das Placas Eletrônicas Através da Análise Hierárquica**. In: Congresso Brasileiro De Gestão Ambiental, 4, Salvador, 2013. p. 1-11.

ZENI, Adriana Marize; MACEDO, Marcelo; FREITAS FILHO, Fernando Luiz; HURTADO, Ana Lúcia Beretta; OLIVEIRA, Ivanir Luiz de. **Tecnologias para o tratamento e reciclagem de resíduo eletrônico como práticas sustentáveis inovadoras**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2., 2012, Ponta Grossa.



# **Engenharia Moderna:** Soluções para Problemas da Sociedade e da Indústria 3

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

